

مدل‌سازی دانسیته ظاهری در طی خشک‌کردن آلوی پیش‌تیمارشده با اولتراسوند و آبگیری اسمزی

رسول قربانی^۱، جلال دهقان‌نیا^۲، سیدصادق سیدلو هریس^۳، بابک قنبرزاده^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲. استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳. استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۴. دانشیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: 92/6/26، تاریخ پذیرش: 92/7/25)

چکیده

در این تحقیق، تأثیر به‌کارگیری هم‌زمان پیش‌تیمارهای اولتراسوند و آبگیری اسمزی بر تغییرات دانسیته ظاهری آلو طی خشک‌شدن در دمای 80 درجه سانتی‌گراد و سرعت هوای 1/4 متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. پیش‌تیمارهای انجام‌شده شامل اولتراسوند در 2 زمان 10 و 30 دقیقه، غلظت محلول اسمزی در 2 بریکس 50 و 70 و زمان فرایند اسمز در 4 زمان 60، 120، 180 و 240 دقیقه بودند. در ادامه، مدل‌سازی دانسیته ظاهری توسط مدل‌های موجود در منابع و همچنین مدل‌های پیشنهادی در این تحقیق انجام گرفت. نتایج نشان داد که استفاده هم‌زمان از اولتراسوند و آبگیری اسمزی، میزان دانسیته ظاهری را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش می‌دهد. همچنین، افزایش زمان اولتراسوند، غلظت محلول اسمزی و زمان فرایند اسمز باعث افزایش دانسیته ظاهری شد. علاوه‌براین، یکی از مدل‌های توسعه یافته پیشنهادی به‌عنوان مناسب‌ترین مدل پیش‌بینی‌کننده دانسیته ظاهری آلو تحت شرایط مورد آزمایش انتخاب شد. سپس، با انجام آنالیز رگرسیون غیرخطی مدل انتخابی، رابطه بین ضرایب مدل با متغیرهای به‌کار رفته در این تحقیق به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کردن آلو، اولتراسوند، آبگیری اسمزی، دانسیته ظاهری، مدل‌سازی.

1- مقدمه

آلوی خشک‌شده، می‌توان به افزودن آن به غذاها برای بهبود ارزش تغذیه‌ای و عطر و طعم آن‌ها اشاره نمود [3]. براساس تحقیقات مختلف انجام‌شده در زمینه خشک‌کردن آلو با استفاده از پیش‌تیمارهای مختلف، فرایند خشک‌کردن آلو تا رسیدن به محتوی رطوبت 0/25 الی 0/86 کیلوگرم آب بر کیلوگرم ماده خشک این محصول گزارش‌شده است [4 و 5].

در گذشته محصولات کشاورزی به‌صورت سنتی در مقابل نور خورشید خشک می‌شدند که روش بسیار آسان و کم‌هزینه‌ای بود [6]. اما چنین روشی دارای معایبی از جمله کاهش کیفیت، غیر قابل کنترل بودن شرایط فرایند، نیاز به فضای زیاد، خشک‌شدن غیریکنواخت و طولانی بودن زمان خشک‌شدن است [7]. متداول‌ترین روش خشک‌کردن مواد غذایی و از جمله آلو استفاده از جریان هوای داغ با جابه‌جایی اجباری است که در آن هوای داغ با عبور از سطح ماده غذایی باعث تبخیر آب و رسیدن رطوبت آن به حد مورد نظر می‌شود. خشک‌کردن با هوای داغ به‌عنوان روشی برای تولید میوه‌ها و سبزی‌های خشک، به‌طور گسترده به‌کار می‌رود. این روش علاوه بر داشتن مزایایی مانند امکان کنترل دقیق دما و عدم نیاز به تماس مستقیم دارای معایبی نیز است. از جمله این معایب، نیاز به زمان بیش‌تر و دمای بالاتر برای خشک‌کردن محصول طی دوره سرعت نزولی می‌باشد. علاوه بر این، دماهای بالا باعث کاهش ارزش تغذیه‌ای و افزایش مصرف انرژی می‌شود [8]. از سوی دیگر، به‌هنگام خشک‌کردن مواد غذایی، تغییرات فیزیکی و شیمیایی مختلفی در ساختار مواد غذایی اتفاق می‌افتد که موجب تغییر خصوصیات کیفی محصول نهایی خشک‌شده در مقایسه با محصول اولیه می‌گردد. یکی از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی که در زمان خشک‌شدن مواد غذایی همراه با نفوذ رطوبت به خارج از ماده غذایی رخ می‌دهد، چروکیدگی و تغییر دانسیته ظاهری می‌باشد. انتقال جرم و حرارت هم‌زمان در هنگام خشک‌شدن مواد غذایی، تنش‌هایی در ساختار سلولی مواد غذایی ایجاد می‌کند که منجر به تغییر شکل و چروکیدگی می‌گردد [9]. چروکیدگی باعث افت خصوصیات کمی و کیفی محصول خشک‌شده می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به کاهش حجم و کاهش قابلیت جذب مجدد آب اشاره کرد. هر نوع کاهش در حجم مواد غذایی، تغییر در دانسیته ظاهری و

آلو میوه‌ای تک هسته‌ای با نام علمی پرونوس دومستیکا¹ از خانواده روزاسه² است [1]. گونه‌های متفاوت از این میوه در دنیا وجود دارد که از نظر رنگ، شکل و اندازه تنوع زیادی دارند. برخی از آن‌ها به رنگ زرد و پر آب بوده و برخی دیگر رطوبت کم‌تری داشته و قرمز متمایل به ارغوانی هستند. قطر آلو از 3-6 سانتی‌متر و طعم آن از ترش تا شیرین متغیر است. آلو منبع بسیار خوبی از کربوهیدرات، ویتامین A، کلسیم، منیزیم، آهن، پتاسیم، فیبر و حاوی مقدار قابل توجهی ویتامین C می‌باشد. آلو در ایران نیز به‌دلیل تولید مقدار بالای آن، یکی از مهم‌ترین میوه‌ها به‌شمار می‌آید. این محصول به‌دلیل درصد رطوبت بالا، دارای فعالیت متابولیکی زیادی بوده که پس از برداشت محصول نیز ادامه یافته و موجب فاسدشدن آن می‌شوند. به‌طور معمول، این میوه به‌دلیل داشتن فصل برداشت کوتاه، به شکل خشک‌شده نگهداری و مصرف می‌شود [2].

میزان رطوبت بالا در میوه‌ها، نقش مهمی در زنجیره حمل و نقل و ذخیره‌سازی آن‌ها ایفا می‌کند. رشد میکروکروب‌ها، بد رنگی، پیدایش طعم نامناسب و کاهش ارزش تغذیه‌ای از جمله حالتی هستند که به‌دنبال نگهداری میوه‌های دارای رطوبت بالا اتفاق می‌افتد و محصول را برای مصرف انسان نامطلوب می‌سازد. بنابراین، کاهش رطوبت یا خشک‌کردن از طریق انتقال هم‌زمان جرم و حرارت، به‌طور گسترده برای افزایش ماندگاری، تسهیل حمل و نقل، حفظ کیفیت و کاهش افت پس از برداشت محصولات کشاورزی و به‌منظور تولید میوه‌ها و سبزی‌های خشک‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مهندسی صنایع غذایی، خشک‌کردن یک نوع عملیات حرارتی تحت شرایط کنترل‌شده برای کاهش آب موجود در مواد غذایی با استفاده از تبخیر رطوبت می‌باشد که این عملیات موجب افزایش پایداری ماده غذایی از طریق کاهش فعالیت آبی و رشد میکروارگانیسم‌ها می‌گردد. علاوه بر مصرف تازه‌خوری، خشک‌کردن میوه‌های مختلف از جمله آلو مرسوم بوده و این محصولات در بازار با قیمت بالایی به فروش می‌رسند. ضمن آن‌که نوع خشک این میوه را می‌توان به‌مدت 6 ماه در جای خشک و خنک نگهداری نمود. از جمله موارد مصرف

1. Prunus Domestica
2. Rosaceae

تخلخل را در پی دارد [10].

کاهش هزینه‌های تولید محصول خشک می‌شود [15 و 16].

دانسیته از خصوصیات فیزیکی مواد غذایی است که مقدار آن وابسته به محتوی رطوبت در طول فرایند خشک‌کردن می‌باشد [11]. در رطوبت بالا به دلیل حالت لاستیکی ماده غذایی، کاهش حجم متناسب با کاهش رطوبت می‌باشد؛ در حالی که در رطوبت پایین، ماده از حالت لاستیکی به شیشه‌ای عبور کرده و دمای انتقال شیشه‌ای¹ افزایش پیدا می‌کند. به طوری که، تحرک کم شبکه مواد جامد به علت حالت شیشه‌ای آن، منجر به کاهش قابل توجه چروکیدگی و کاهش دانسیته ظاهری می‌شود؛ در این مرحله امکان تشکیل خلل و فرج وجود دارد [12]. از این رو، دانسیته ظاهری اطلاعات خوبی در مورد چروکیدگی، تخلخل و قابلیت جذب مجدد آب ارائه می‌دهد. علاوه بر این، پدیده‌های انتقال جرم و حرارت تحت تأثیر دانسیته ظاهری قرار می‌گیرد [11]. دانسیته ظاهری و تخلخل بر روی ضریب انتشار موثر رطوبت و ضریب هدایت گرمایی ماده غذایی در طول فرایند خشک‌کردن تأثیر می‌گذارد. با افزایش تخلخل، ضریب انتشار موثر رطوبت افزایش می‌یابد، ضمن آن که ضریب هدایت حرارتی مواد غذایی متخلخل به دلیل وجود هوا در آن‌ها کم‌تر است. از این رو در فرایند خشک‌کردن، زمانی که شبیه‌سازی و پیش‌بینی ترکیب رطوبت و حرارت در داخل ماده غذایی مدنظر باشد، بایستی چروکیدگی و دانسیته ظاهری لحاظ شود؛ چرا که چروکیدگی و دانسیته ظاهری روند خشک‌شدن را از طریق تغییر ضریب انتشار موثر رطوبت تغییر می‌دهد [13 و 14].

از طرف دیگر، وجود لایه مومی موجود در آلو، باعث ایجاد مقاومت در مقابل خروج رطوبت در هنگام خشک‌شدن آن با استفاده از جریان هوای داغ با جابه‌جایی اجباری می‌گردد و به طور معمول برای از بین بردن این لایه، از یک‌سری مواد شیمیایی استفاده می‌شود [4]. استفاده از این مواد شیمیایی باعث ایجاد طعم نامطلوب در آلودی خشک‌شده خواهد شد. به منظور بهبود خصوصیات کمی و کیفی محصولات خشک‌شده و برطرف کردن عیوب خشک‌کردن با جریان هوای داغ، استفاده از تکنولوژی‌های جدید مانند اولتراسوند و آگیری اسمزی به طور وسیعی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند به دلیل کاهش زمان خشک‌شدن، باعث

اولتراسوند یکی از فناوری‌های نوظهور است که کاربرد آن در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی، چه برای آنالیز غیر تخریبی و چه برای اهداف فرایندی، روز به روز در حال گسترش است [17]. تکنولوژی اولتراسوند بر اساس امواج مکانیکی در یک فرکانس بالاتر از محدوده شنوایی انسان تولید می‌شود. این امواج در فراوری، آنالیز و کنترل کیفیت مواد غذایی بر اساس محدوده فرکانس به دو دسته اولتراسوند با انرژی پایین (فرکانس بالا و توان پایین) و اولتراسوند با انرژی بالا (فرکانس پایین و توان بالا) تقسیم‌بندی می‌شود. اولتراسوند با انرژی بالا به عنوان پیش‌تیمار قبل از فرایند خشک‌کردن با هوای داغ جهت بهبود خصوصیات کیفی محصول خشک‌شده از طریق بهبود پدیده انتقال جرم و حرارت به کار می‌رود [18]. پیش‌تیمار اولتراسوند با غوطه‌ور کردن میوه در آب مقطر یا محلول آبی هیپرتونیک¹ و اعمال امواج اولتراسوند صورت می‌گیرد. امواج اولتراسوند باعث ایجاد حباب‌های ریز هوا در داخل محیط مایع و سپس ترکیدن آن‌ها می‌شوند که به این پدیده کاویتاسیون می‌گویند. ترکیدن غیرمتقارن این حباب‌ها در نزدیکی سطح ماده غذایی باعث انتقال جریان‌های سریع و فورانی از امواج صوتی به سطح آن شده و با ایجاد انقباض و انبساط‌های پی‌درپی (اثر اسفنجی²) در آن، باعث تشکیل کانال‌های میکروسکوپی و سهولت خروج آب از داخل محصول در طی خشک‌شدن می‌شود [19 و 20]. از دیگر اثرات اولتراسوند، تنش سطحی و تغییر شکل مواد جامد متخلخل می‌باشد که این اثرات مسئول ایجاد کانال‌های میکروسکوپی، کاهش لایه مرزی انتشار و افزایش انتقال جرم کئوکسیونی در مواد غذایی می‌باشد [21]. مزیت دیگر استفاده از اولتراسوند، نیاز به استفاده از دمای کم‌تر در طول فرایند خشک‌کردن می‌باشد. در نتیجه، اولتراسوند بدون داشتن اثرات سوء بر روی ویژگی‌های کیفی ماده غذایی می‌تواند به عنوان یک پیش‌تیمار در خشک‌کردن محصولات غذایی حساس به حرارت به کار رود؛ چون باعث افزایش سرعت و کاهش دمای مورد نیاز برای خشک‌کردن می‌شود [22].

در تحقیقی، اثر شدت‌های مختلف پیش‌تیمار اولتراسوند بر روی خصوصیات فیزیکی نمونه‌های سیب در طی خشک‌کردن با

از طرف دیگر، وجود لایه مومی موجود در آلو، باعث ایجاد مقاومت در مقابل خروج رطوبت در هنگام خشک‌شدن آن با استفاده از جریان هوای داغ با جابه‌جایی اجباری می‌گردد و به طور معمول برای از بین بردن این لایه، از یک‌سری مواد شیمیایی استفاده می‌شود [4]. استفاده از این مواد شیمیایی باعث ایجاد طعم نامطلوب در آلودی خشک‌شده خواهد شد. به منظور بهبود خصوصیات کمی و کیفی محصولات خشک‌شده و برطرف کردن عیوب خشک‌کردن با جریان هوای داغ، استفاده از تکنولوژی‌های جدید مانند اولتراسوند و آگیری اسمزی به طور وسیعی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از پیش‌تیمار اولتراسوند به دلیل کاهش زمان خشک‌شدن، باعث

1. Hypertonic
2. Sponge effect

1. Glass transition temperature

کرده و حداقل چروکیدگی و آسیب سلولی را باعث می‌شود. علاوه بر این، امکان فرمولاسیون در محصول نهایی با شیرین کردن یا شور کردن ماده غذایی در آبگیری اسمزی فراهم می‌شود. فرایند آبگیری اسمزی به‌طور معمول در شرایط اتمسفری صورت گرفته و آسیب حرارتی به رنگ و بافت را به حداقل می‌رساند و باعث افزایش کیفیت محصولات غذایی می‌شود [26].

در مطالعه‌ای، تغییرات و مدل‌سازی چروکیدگی، دانسیته و تخلخل میوه به، در طی خشک‌شدن با استفاده از روش‌های مختلف خشک‌کردن مورد تحقیق قرار گرفت [9]. نتایج نشان داد که دانسیته ظاهری و چروکیدگی میوه به، تحت تأثیر روش خشک‌کردن قرار می‌گیرند. در روش آبگیری اسمزی و سپس خشک‌کردن با جابه‌جایی اجباری هوا، دانسیته ظاهری با کاهش محتوی رطوبت افزایش پیدا کرد که این امر ناشی از پرشدن فضاهای خالی ناشی از خروج رطوبت از محصول با مواد جامد محلول در محلول اسمزی می‌باشد؛ اما در خشک‌کردن انجمادی، دانسیته ظاهری با کاهش محتوی رطوبت کاهش یافت. در ادامه، مدل‌سازی دانسیته ظاهری توسط مدل‌های مختلف صورت گرفت و مدل لوزانو¹ به‌عنوان بهترین مدل برازش‌کننده داده‌های آزمایشی انتخاب شد. در تحقیقی دیگر، تأثیر پیش‌ تیمار اولتراسوند بر روی جذب ماده جامد در طی آبگیری اسمزی خربزه مورد مطالعه قرار گرفت [27]. در این پژوهش، استفاده هم‌زمان از اولتراسوند و آبگیری اسمزی، جذب ماده جامد نمونه‌ها را افزایش داد و علت آن ایجاد کانال‌های میکروسکوپی توسط اولتراسوند و سپس خروج سریع‌تر و راحت‌تر رطوبت از داخل کانال‌های میکروسکوپی ایجاد شده و ورود ماده جامد قندی (ساکارز) به داخل نمونه در اثر آبگیری اسمزی بیان شد. این نتیجه نشانگر دانسیته ظاهری بیش‌تر در اثر ورود مواد جامد محلول به داخل نمونه‌ها می‌باشد.

خشک‌کردن محصولات کشاورزی، پدیده پیچیده‌ای است که شامل انتقال جرم و حرارت هم‌زمان می‌باشد. بنابراین، مدل‌سازی یک روش مناسب برای درک پدیده‌های درگیر در طی فرایندهای مختلف اعمال‌شده روی مواد غذایی و پیش‌بینی رفتار ماده تحت عوامل درونی و بیرونی متعدد می‌باشد [28].

از سوی دیگر، یکی از مهم‌ترین تغییرات فیزیکی که در زمان

جریان هوای داغ مورد بررسی قرار گرفت [23]. نتایج به‌دست آمده نشان داد که با اعمال و افزایش زمان اولتراسوند، میزان انتقال جرم در نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با اولتراسوند نسبت به تیمار شاهد بیش‌تر شده و زمان خشک‌شدن در آن‌ها کاهش یافته و در نتیجه میزان دانسیته ظاهری کاهش و به‌دنبال آن، میزان تخلخل نمونه‌های سیب افزایش پیدا کرده است. همچنین در تحقیقی دیگر، تأثیر پیش‌ تیمار اولتراسوند بر میزان انتقال جرم و ویژگی آبگیری مجدد در طی خشک‌کردن نمونه‌های قارچ دکمه‌ای، کلم بروکلی و گل کلم مورد مطالعه قرار گرفت [24]. نتایج نشان داد که زمان خشک‌شدن در نمونه‌های پیش‌ تیمار شده با اولتراسوند کاهش یافت. نمونه‌های خشک‌شده با خشک‌کن انجمادی به‌همراه نمونه‌های اولتراسوند شده، بیش‌ترین قابلیت را در آبگیری مجدد از خود نشان دادند. این نتیجه بیانگر دانسیته و آسیب بافتی کم‌تر و تخلخل بیش‌تر توسط اولتراسوند و قابلیت بالای این نمونه‌ها در طی آبگیری مجدد است.

علاوه بر اولتراسوند، آبگیری اسمزی نیز قبل از فرایند خشک‌کردن با هوای گرم با هدف بهبود خواص تغذیه‌ای، حسی و کیفی محصول نهایی خشک‌شده به‌کار می‌رود [25]. آبگیری اسمزی شامل خارج نمودن بخشی از آب مواد غذایی، بدون تغییر فاز، توسط غوطه‌ور کردن آن‌ها در محلول‌های هیپرتونیک می‌باشد. ساکارز یکی از پرمصرف‌ترین مواد مورد استفاده به‌عنوان عامل اسمز در فرایند آبگیری اسمزی محسوب می‌شود و به‌ویژه برای میوه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در یک سیستم حاوی ماده غذایی و محلول اسمزی، خروج آب بر اساس پدیده اسمز از بین یک غشا نیمه تراوا مثل غشا سلولی ماده غذایی صورت می‌گیرد. در فرایند آبگیری اسمزی، دو جریان عمده شامل جریان آب و جریان محلول اسمزی به‌طور هم‌زمان اتفاق می‌افتد که در آن انتقال جرم تابعی از اختلاف غلظت می‌باشد. با توجه به این‌که، غلظت آب در داخل ماده غذایی و غلظت ماده قندی در محلول اسمزی بالا می‌باشد، جریان آب به خارج از ماده غذایی و جریان ماده قندی به درون ماده غذایی صورت می‌گیرد. با نفوذ مواد جامد محلول به داخل ماده غذایی، فضاهای خالی ناشی از خروج رطوبت از محصول پر می‌شوند. در نتیجه، به میزان قابل توجهی بافت را محافظت

جهت متعادل‌سازی دمای نمونه‌ها با دمای محیط، نمونه‌ها از سردخانه به آزمایشگاه انتقال یافت. برای بررسی تأثیر به‌کارگیری هم‌زمان اولتراسوند و آبیگری اسمزی، از حمام اولتراسوند (مدل USD-4R)، ساخت ژاپن، مجهز به سیستم تنظیم فرکانس و زمان تیماردی (با فرکانس 40 کیلوهرتز و در 2 سطح زمانی 10 و 30 دقیقه، غلظت محلول اسمزی ساکارز در 2 بریکس 50 و 70 و زمان فرایند اسمز نیز در 4 زمان 60، 120، 180 و 240 دقیقه استفاده شد. قبل از شروع خشک‌کردن، نمونه‌ها در معرض امواج اولتراسوند در دمای محیط قرار گرفتند. سپس، نمونه‌ها از حمام اولتراسوند خارج و در محلول اسمزی ساکارز با غلظت مشخص غوطه‌ور شدند. نسبت نمونه به محلول اسمزی در کل آزمایش‌ها 1 به 4 بود. بعد از سپری شدن زمان فرایند اسمز، نمونه‌ها از محلول اسمزی خارج و پس از حذف رطوبت سطحی توسط کاغذهای جاذب رطوبت، به یک خشک‌کن سینی‌دار آزمایشگاهی (مدل UOP 8 Tray dryer, Armfield)، مجهز به سیستم ثبت خودکار داده‌ها، واحد کنترل‌کننده دما، سرعت جریان و رطوبت نسبی (هوا) منتقل شد.

2-2- آماده‌سازی محلول اسمزی

محلول اسمزی ساکارز در دو غلظت با بریکس 50 و 70 به‌صورت زیر تهیه شد:

ابتدا مقدار مشخصی از ساکارز با توجه به هر آزمایش به داخل بشر ریخته‌شده و با استفاده از آب مقطر، به حجم مورد نظر رسانده شد. سپس، به‌وسیله عمل هم‌زدن تمام ساکارز در آب مقطر حل و محلول اسمزی با بریکس مشخص به‌دست آمد.

2-3- خشک‌کن آزمایشگاهی

برای مقایسه خصوصیات کمی و کیفی نمونه‌های پیش‌تیمارشده با فرایند اولتراسوند و آبیگری اسمزی با نمونه شاهد، از یک دستگاه خشک‌کن سینی‌دار آزمایشگاهی استفاده شد (شکل 1). این خشک‌کن دارای محفظه ورودی (شامل فن و گرم‌کن‌های الکتریکی)، محفظه میانی (شامل قفسه‌های خشک‌کن و خطی‌سازهای جریان هوا)، محفظه خروجی و تابلو

خشک شدن مواد غذایی همراه با نفوذ رطوبت به‌خارج از ماده غذایی رخ می‌دهد، دانسیته ظاهری می‌باشد که یک فاکتور مهم در ارزیابی کیفی محصول خشک‌شده به‌شمار می‌رود. این پدیده، خصوصیات فیزیکی ماده غذایی از جمله انتقال جرم در طول آبیگری مجدد محصول خشک‌شده نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این‌رو، مدل‌سازی دانسیته ظاهری با هدف افزایش کیفیت محصول خشک‌شده، طراحی‌هایی با قابلیت اطمینان بالا، بهینه‌سازی طراحی‌ها و شرایط عملیات و ارزیابی عملکرد فرایند، ضروری است. بدین منظور، مدل‌های ریاضی مختلفی به‌منظور بررسی رابطه بین دانسیته ظاهری و محتوی رطوبت میوه‌ها و سبزی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تحقیقی، با استفاده از برازش دانسیته ظاهری نمونه‌های مختلف مواد غذایی به‌صورت تابعی از نسبت رطوبت به هنگام خشک‌شدن این مواد غذایی، یک مدل نظری به‌دست آمد [11]. علاوه‌براین، دانسیته ظاهری نمونه‌های خشک‌شده با جریان هوای داغ و خشک‌کن انجمادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در نمونه‌های خشک‌شده توسط جریان هوای داغ، میزان دانسیته ظاهری بیشتر و میزان تخلخل کم‌تر می‌باشد؛ در حالی‌که در خشک‌کردن انجمادی، دانسیته ظاهری کم‌تر و تخلخل بیش‌تر بود.

با توجه به اینکه، بر اساس اطلاعات موجود، تاکنون تأثیر به‌کارگیری هم‌زمان پیش‌تیمارهای اولتراسوند و آبیگری اسمزی بر دانسیته ظاهری آلو به‌هنگام خشک‌شدن مورد بررسی قرار نگرفته است، بنابراین، هدف از این تحقیق، مطالعه تأثیر دو پیش‌تیمار مذکور بر تغییرات میزان دانسیته ظاهری نمونه‌های آلو در طی خشک‌شدن با جریان هوای داغ، مدل‌سازی تغییرات آن و انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی‌کننده تغییرات دانسیته ظاهری بود.

2- مواد و روش‌ها

2-1- تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

آلو بخارای مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های خشک‌کردن، از یک باغ محلی واقع در استان آذربایجان شرقی، شهرستان شبستر تهیه و تا پایان آزمایش‌ها در سردخانه با دمای $4 \pm 1^\circ\text{C}$ نگهداری شدند. حدود یک ساعت قبل از شروع هر آزمایش،

فرمان (محفظه کنترل‌کننده دما و سرعت) بود [6].

2-6- مدل‌سازی دانسیته ظاهری

برای برازش تغییرات دانسیته ظاهری نمونه‌های آلو در مقابل محتوی رطوبت (بر حسب گرم آب بر گرم ماده خشک) از تعدادی مدل تجربی و پیشنهادی استفاده شد (جدول 2). منحنی‌های تغییرات دانسیته ظاهری به‌دست آمده برای آلو در شرایط مختلف خشک‌کردن، با مدل‌های جدول 2 برازش‌شده و ضرایب آن‌ها توسط نرم افزار MATLAB R2011a تعیین گردید. به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین مدل توصیف‌کننده تغییرات دانسیته ظاهری در طی خشک‌کردن آلو، معیارهای ضریب تبیین¹ (R^2)، ریشه متوسط خطای داده‌ها² (RMSE) و مجموع مربعات خطا³ (SSE) توسط هر مدل محاسبه و با مدل‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفت. مدل دارای R^2 بالا و RMSE و SSE پایین، به‌دلیل برازش بهتر داده‌های آزمایشی، به‌عنوان بهترین مدل توصیف‌کننده تغییرات دانسیته ظاهری انتخاب گردید. آنالیز رگرسیونی غیرخطی نیز در ادامه برازش داده‌ها و به‌منظور برآورد ضرایب مدل انتخابی به‌صورت توابعی از زمان اولتراسوند، غلظت محلول اسمزی و زمان فرایند اسمز توسط نرم افزار Excel 2007 انجام شد.

2-7- آنالیز آماری

به‌منظور بررسی اثر اولتراسوند و آبگیری اسمزی بر دانسیته ظاهری آلو، آنالیز داده‌ها توسط نرم افزار SAS 9.1 و با استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه فاکتور A (زمان اولتراسوند)، B (غلظت محلول اسمزی) و C (زمان فرایند اسمز) و مقایسه میانگین‌ها نیز به روش بونفرونی⁴ در سطح احتمال 5٪ ($p < 0.05$) انجام شد [32].

3- نتایج و بحث

3-1- تأثیر اولتراسوند و آبگیری اسمزی بر دانسیته ظاهری

شکل 2 (الف-د) تغییرات دانسیته ظاهری نمونه‌های آلو را به‌صورت تابعی از محتوی رطوبت (گرم آب بر گرم ماده خشک) طی خشک‌شدن و در بین تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1 نشان می‌دهد.

2-4- طرح کلی آزمایش‌ها

حدود نیم ساعت قبل از شروع فرایند، دستگاه خشک‌کن روشن و سرعت هوا در 1/4 متر بر ثانیه و دما در 80 درجه سانتی‌گراد تنظیم شد تا دمای هوای خشک‌کن به حالت پایدار برسد [5، 29 و 30]. سپس، نمونه‌ها بر روی سینی توری چیده شدند که به‌طور مستقیم به ترازو متصل بود و کاهش وزن آن‌ها در فواصل زمانی تعیین‌شده، اندازه‌گیری و ثبت می‌شد. خشک‌کردن نمونه‌ها تا رسیدن به محتوی رطوبت 0/54 گرم آب بر گرم ماده خشک انجام شد. آزمایش‌های خشک‌کردن در 2 تکرار و 17 تیمار انجام گرفت. جدول 1 تیمارهای مختلف و علائم اختصاری آن‌ها را نشان می‌دهد.

2-5- محاسبه دانسیته ظاهری

برای محاسبه دانسیته ظاهری، جرم و حجم نمونه‌ها طی خشک‌کردن در محتوای رطوبت 0/9، 1/4، 2/1، 2/9، 3/4 و 0/54 گرم آب بر گرم ماده خشک اندازه‌گیری شد. حجم نمونه‌ها توسط روش جابه‌جایی حلال (تولوئن) و با استفاده از پیکنومتر به‌دست آمد. در این روش، ابتدا پیکنومتر حاوی تولوئن به‌صورت کاملاً پر توزین شد. سپس، نمونه‌ها پس از توزین در داخل پیکنومتر حاوی تولوئن قرار گرفتند و تولوئن اضافی از پیکنومتر خارج شد. حجم تولوئن جابه‌جا شده (و به دنبال آن حجم نمونه‌ها) و دانسیته ظاهری به‌ترتیب توسط معادلات 1 و 2 محاسبه شد [31]:

$$V = \frac{M}{\rho_{10}} = \frac{m - m' - m''}{\rho_{10}} \quad (1)$$

$$\rho_b = \frac{m'}{V} \quad (2)$$

در معادلات 1 و 2، V، حجم تولوئن جابه‌جا شده = حجم نمونه‌های آلو بر حسب سانتی‌متر مکعب، m' و m'' به‌ترتیب جرم نمونه آلو و جرم پیکنومتر خالی بر حسب گرم، m ، جرم پیکنومتر حاوی تولوئن و نمونه آلو، M، جرم تولوئن جابه‌جا شده، ρ_{10} و ρ_b به‌ترتیب دانسیته تولوئن و دانسیته ظاهری آلو بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب است.

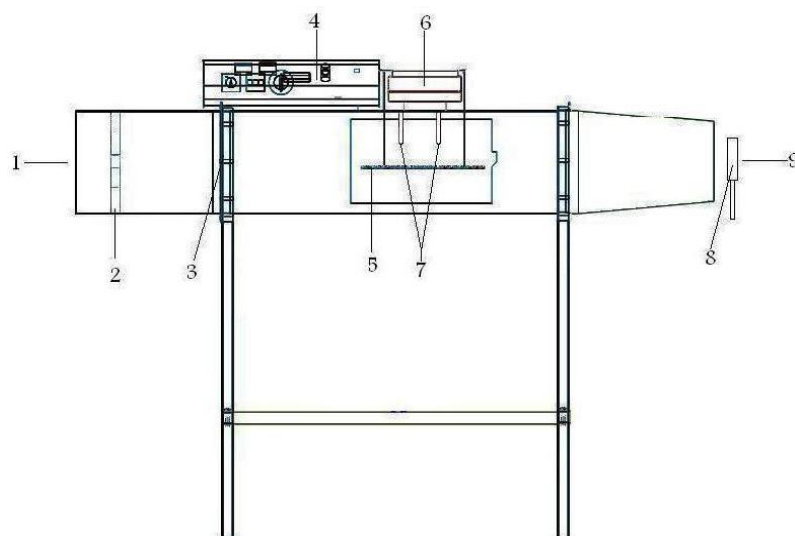
1. Coefficient of determination
2. Root Mean Square Error
3. Sum Square Error
4. Bonferoni

جدول (1) علائم اختصاری مورد استفاده برای تیمارهای مختلف

ردیف	تیمار	علامت اختصاری
1	اولتراسوند با زمان 0 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 0 و زمان غوطه‌وری 0 دقیقه	Control
2	اولتراسوند با زمان 10 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 50 و زمان غوطه‌وری 60 دقیقه	U10-B50-T60
3	اولتراسوند با زمان 10 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 70 و زمان غوطه‌وری 60 دقیقه	U10-B70-T60
4	اولتراسوند با زمان 30 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 50 و زمان غوطه‌وری 60 دقیقه	U30-B50-T60
5	اولتراسوند با زمان 30 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 70 و زمان غوطه‌وری 60 دقیقه	U30-B70-T60
6	اولتراسوند با زمان 10 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 50 و زمان غوطه‌وری 120 دقیقه	U10-B50-T120
7	اولتراسوند با زمان 10 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 70 و زمان غوطه‌وری 120 دقیقه	U10-B70-T120
8	اولتراسوند با زمان 30 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 50 و زمان غوطه‌وری 120 دقیقه	U30-B50-T120
9	اولتراسوند با زمان 30 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 70 و زمان غوطه‌وری 120 دقیقه	U30-B70-T120
10	اولتراسوند با زمان 10 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 50 و زمان غوطه‌وری 180 دقیقه	U10-B50-T180
11	اولتراسوند با زمان 10 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 70 و زمان غوطه‌وری 180 دقیقه	U10-B70-T180
12	اولتراسوند با زمان 30 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 50 و زمان غوطه‌وری 180 دقیقه	U30-B50-T180
13	اولتراسوند با زمان 30 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 70 و زمان غوطه‌وری 180 دقیقه	U30-B70-T180
14	اولتراسوند با زمان 10 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 50 و زمان غوطه‌وری 240 دقیقه	U10-B50-T240
15	اولتراسوند با زمان 10 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 70 و زمان غوطه‌وری 240 دقیقه	U10-B70-T240
16	اولتراسوند با زمان 30 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 50 و زمان غوطه‌وری 240 دقیقه	U30-B50-T240
17	اولتراسوند با زمان 30 دقیقه، محلول اسمزی با بریکس 70 و زمان غوطه‌وری 240 دقیقه	U30-B70-T240

جدول (2) مدل‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی دانسیته ظاهری

ردیف	نام مدل	مدل ریاضی	مرجع
1	Wang & Brennan, 1995	$\rho_b = a \exp(bX^2) + c$	Khalloufi et al., 2010
2	Lozano et al., 1983	$\rho_b = a \exp(bX) + cX + d$	Khalloufi et al., 2010
3	Krokida & Maroulis, 1997	$\rho_b = \frac{a(X+1)}{(bX+1)}$	Khalloufi et al., 2010
4	مدل پیشنهادی	$\rho_b = a \exp(-bX) - cX$	تحقیق حاضر
5	مدل پیشنهادی	$\rho_b = \frac{aX+1}{b+X}$	تحقیق حاضر
6	مدل پیشنهادی	$\rho_b = \frac{aX+b}{cX+1}$	تحقیق حاضر

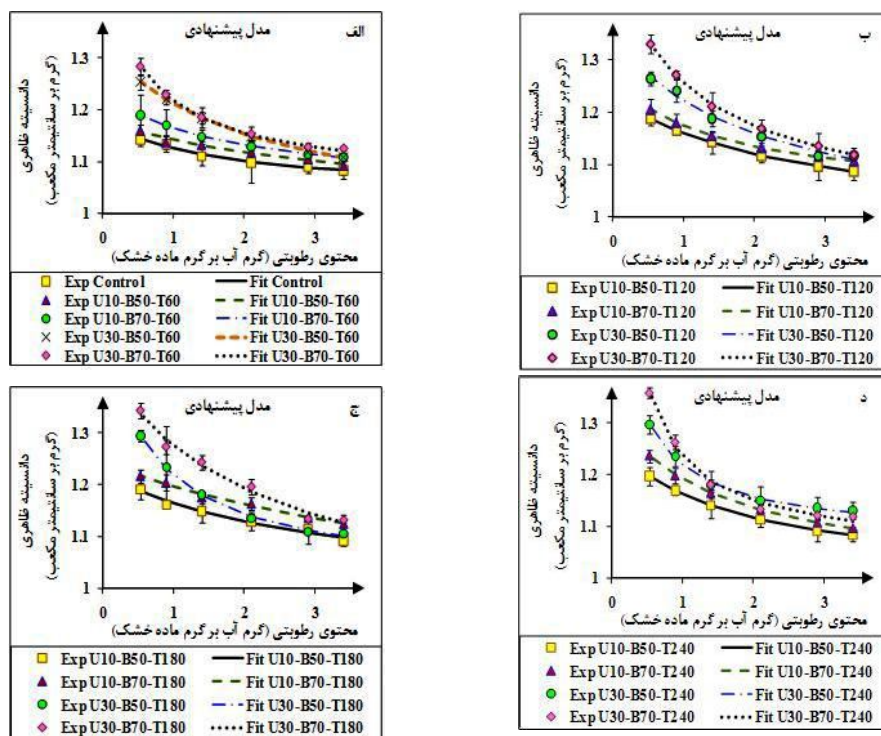


شکل (1) شماتیک خشک‌کن مورد استفاده: (1) ورودی هوا، (2) فن، (3) گرم‌کن، (4) تابلو فرمان یا محفظه کنترل‌کننده دما و سرعت، (5) سینی سوراخ‌دار، (6) ترازوی دیجیتال، (7) سنسور رطوبتی، (8) سرعت‌سنج دیجیتالی هوا، (9) خروجی هوا

دانسیتته ظاهری را در پی خواهد داشت. نتایج سایر محققان نیز تاییدکننده این نتایج هستند [9، 16 و 27].

از سوی دیگر، جدول 3، مقایسه میانگین‌های اثر متقابل اولتراسوند و آبگیری اسمزی را بر میزان دانسیته ظاهری نهایی تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1 نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این جدول برمی‌آید، تمامی پیش‌تیمارها در مقایسه با نمونه شاهد، دانسیته ظاهری بیش‌تری از خود نشان دادند و اثر متقابل استفاده هم‌زمان از اولتراسوند و آبگیری اسمزی، از لحاظ آماری تأثیر معنی‌دار بر روی دانسیته ظاهری داشت. با توجه به معادله 2، دانسیته ظاهری رابطه مستقیم با جرم و رابطه معکوس با حجم نمونه‌های آلو دارد؛ بر این اساس، افزایش دانسیته ظاهری در اثر به‌کارگیری هم‌زمان پیش‌تیمارهای اولتراسوند و آبگیری اسمزی، به‌علت افزایش جرم ناشی از ورود ماده جامد محلول (ساکارز) در طی آبگیری اسمزی و کاهش حجم در طی خشک‌کردن با هوای داغ می‌باشد. در بررسی اثر اولتراسوند بر دانسیته ظاهری نمونه‌های آلو، با ملاحظه جدول 3 و شکل 2 می‌توان دریافت که با انجام اولتراسوند و افزایش زمان آن از 10 به 30 دقیقه و با ثابت در نظر گرفتن غلظت محلول اسمزی و زمان فرایند اسمز، دانسیته ظاهری در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافته است. این امر می‌تواند به‌دلیل باز شدن مسیر لوله‌های موئین در اثر پراکنده‌شدن ترکیبات مومی

همانگونه که از منحنی‌ها پیداست، با کاهش محتوی رطوبت، دانسیته ظاهری تیمارهای مختلف افزایش یافت. در تیمار شاهد، علت افزایش دانسیته ظاهری، کاهش حجم (چروکیدگی) بیش‌تر آلو در اثر خروج آب از داخل ماده غذایی است. این یافته با یافته‌های محققان دیگر مطابقت دارد [33]. به‌کارگیری هم‌زمان پیش‌تیمارهای اولتراسوند و آبگیری اسمزی، دانسیته ظاهری را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد که علت آن به‌دلیل پراکنده شدن ترکیبات مومی سطح پوست آلو و ایجاد کانال‌های میکروسکوپی توسط اولتراسوند و خروج راحت‌تر رطوبت از داخل کانال‌های میکروسکوپی و ورود ماده جامد قندی (ساکارز) به داخل آلو در اثر آبگیری اسمزی می‌باشد. به‌عبارت دیگر، پر شدن فضاهای خالی ایجادشده در نتیجه خروج رطوبت، با مواد جامد محلول اسمزی باعث افزایش دانسیته ظاهری شد. دانسیته مواد غذایی در ارتباط با میزان تخلخل (حجم اشغال‌شده توسط هوا) آن است [12] و هر چه ماده غذایی دارای روزه‌ها و منافذ موئین بیش‌تری باشد، متخلخل‌تر بوده و حجم هوای موجود در آن بیش‌تر است. با به‌کارگیری هم‌زمان پیش‌تیمارهای اولتراسوند و آبگیری اسمزی، میزان روزه‌ها و منافذ موئین ماده غذایی با پر شدن آن‌ها توسط مواد جامد محلول اسمزی، کاهش یافته و این امر کاهش تخلخل و چروکیدگی و در نتیجه افزایش



شکل (2) (الف-d) تغییرات دانسیته ظاهری با کاهش محتوی رطوبت تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1 و برازش آن‌ها با مدل پیشنهادی (مدل 6). در این شکل، Exp، داده‌های حاصل از آزمایش و Fit، داده‌های حاصل از برازش را نشان می‌دهد.

جدول (3) مقایسه میانگین‌های اثر متقابل اولتراسوند و آبیگری اسمزی بر دانسیته ظاهری نهایی تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1

تیمار	دانسیته ظاهری نهایی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
Control	012/0i 142/1
U10-B50-T60	009/0hi 161/1
U10-B70-T60	039/0ghi 189/1
U30-B50-T60	015/0defg 253/1
U30-B70-T60	017/0bcde 282/1
U10-B50-T120	011/0ghi 186/1
U10-B70-T120	019/0fghi 205/1
U30-B50-T120	013/0cdef 263/1
U30-B70-T120	018/0abc 329/1
U10-B50-T180	019/0ghi 191/1
U10-B70-T180	013/0efgh 216/1
U30-B50-T180	012/0abcd 294/1
U30-B70-T180	015/0ab 342/1
U10-B50-T240	018/0fghi 197/1
U10-B70-T240	012/0defg 236/1
U30-B50-T240	018/0abcd 296/1
U30-B70-T240	010/0a 357/1

حروف یکسان در هر ستون، بیلگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال 5٪ می‌باشد.

سطح پوست آلو و ایجاد کانال‌های میکروسکوپی توسط اولتراسوند و خروج راحت‌تر رطوبت از داخل کانال‌های میکروسکوپی و ورود ماده جامد قندی (ساکارز) به داخل آلو در اثر آبیگری اسمزی می‌باشد. به عبارت دیگر، پر شدن فضاهای خالی ایجادشده در نتیجه خروج رطوبت، با مواد جامد محلول اسمزی باعث افزایش دانسیته ظاهری شد. دانسیته مواد غذایی در ارتباط با میزان تخلخل (حجم اشغال‌شده توسط هوا) آن است [12] و هر چه ماده غذایی دارای روزه‌ها و منافذ موئین بیش‌تری باشد، متخلخل‌تر بوده و حجم هوای موجود در آن بیش‌تر است. با به‌کارگیری هم‌زمان پیش‌تیمارهای اولتراسوند و آبیگری اسمزی، میزان روزه‌ها و منافذ موئین ماده غذایی با پر شدن آن‌ها توسط مواد جامد محلول اسمزی، کاهش یافته و این امر کاهش تخلخل و چروکیدگی و در نتیجه افزایش دانسیته ظاهری را در پی خواهد داشت. نتایج سایر محققان نیز تاییدکننده این نتایج هستند [9، 16 و 27].

از سوی دیگر، جدول 3، مقایسه میانگین‌های اثر متقابل اولتراسوند و آبیگری اسمزی را بر میزان دانسیته ظاهری نهایی تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1 نشان می‌دهد.

اسمزی، با افزایش زمان فرایند اسمز از 60 به 240 دقیقه، دانسیته ظاهری افزایش پیدا می‌کند. علت این موضوع را می‌توان به افزایش خروج آب از بافت آلو و ورود ماده جامد محلول بیش‌تر به داخل آن در اثر قرار گرفتن نمونه‌های آلو در معرض محلول اسمزی ساکارز در طی آبیگری اسمزی نسبت داد.

3-2- مدل‌سازی دانسیته ظاهری

در شکل 2 (الف، ب، ج و د)، علاوه بر تأثیر اولتراسوند و آبیگری اسمزی بر میزان دانسیته ظاهری تیمارهای مختلف، می‌توان برآزش تغییرات دانسیته ظاهری نمونه‌های آلو در طول خشک‌شدن آن‌ها را نیز با مدل پیشنهادی (مدل 6 جدول 2) مشاهده کرد. جدول 4 (الف و ب)، پارامترهای آماری حاصل از برآزش تیمارهای مختلف را توسط مدل‌های مختلف بر اساس جدول 2 نشان می‌دهد. با مقایسه مقادیر میانگین این پارامترها، می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی 6 دارای بالاترین مقدار R^2 و پایین‌ترین مقادیر SSE و RMSE نسبت به بقیه مدل‌های جدول 2 می‌باشد. میانگین مقادیر ضریب تبیین، ریشه متوسط خطای داده‌ها و مجموع مربع خطای مدل مذکور در بین تیمارهای مختلف، به ترتیب 0/9924، 0/004 و 0/0001 می‌باشد. بنابراین از بین 6 مدل مورد مطالعه، مدل پیشنهادی 6 به‌عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی تغییرات دانسیته ظاهری آلو در طول خشک‌شدن انتخاب شد. همان‌طور که در شکل 2 (الف-د) مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین مقادیر آزمایشی دانسیته ظاهری با مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط این مدل در همه تیمارهای مورد مطالعه وجود دارد.

معادلات 3، 4 و 5، به ترتیب ضرایب a ، b و c مدل توسعه یافته پیشنهادی (مدل 6) را نشان می‌دهند که از آنالیز رگرسیون غیرخطی به‌دست آمده‌اند. در این معادلات، U زمان اولتراسوند بر حسب دقیقه، B غلظت محلول اسمزی بر حسب بریکس و T زمان فرایند اسمز بر حسب دقیقه است.

$$R^2=0/88 \quad (3)$$

$$a=2.36 \times 10^{-11} \times (U \times B \times T)^2 - 3.49 \times 10^{12} \times U^2 + 2.99 \times 10^{11} \times B^2 + 1.64 \times 10^{-4} \times T^2 - 2.72 \times 10^{-5} \times (U \times B \times T) - 2.89 \times 10^{-3} \times (U \times B) + 1.79 \times 10^{-3} \times (U \times T) + 1.39 \times 10^{14} \times U - 3.59 \times 10^{13} \times B - 5.93 \times 10^{-2} \times T$$

همان‌گونه که از این جدول برمی‌آید، تمامی پیش‌تیمارها در مقایسه با نمونه شاهد، دانسیته ظاهری بیش‌تری از خود نشان دادند و اثر متقابل استفاده هم‌زمان از اولتراسوند و آبیگری اسمزی، از لحاظ آماری تأثیر معنی‌دار بر روی دانسیته ظاهری داشت. با توجه به معادله 2، دانسیته ظاهری رابطه مستقیم با جرم و رابطه معکوس با حجم نمونه‌های آلو دارد؛ بر این اساس، افزایش دانسیته ظاهری در اثر به‌کارگیری هم‌زمان پیش‌تیمارهای اولتراسوند و آبیگری اسمزی، به‌علت افزایش جرم ناشی از ورود ماده جامد محلول (ساکارز) در طی آبیگری اسمزی و کاهش حجم در طی خشک‌کردن با هوای داغ می‌باشد. در بررسی اثر اولتراسوند بر دانسیته ظاهری نمونه‌های آلو، با ملاحظه جدول 3 و شکل 2 می‌توان دریافت که با انجام اولتراسوند و افزایش زمان آن از 10 به 30 دقیقه و با ثابت در نظر گرفتن غلظت محلول اسمزی و زمان فرایند اسمز، دانسیته ظاهری در مقایسه با تیمار شاهد افزایش یافته است. این امر می‌تواند به‌دلیل باز شدن مسیر لوله‌های موئین در اثر پراکنده‌شدن ترکیبات مومی سطح پوست آلو و تشکیل کانال‌های میکروسکوپی طولی‌تر در اثر تغییر شکل سلول‌ها و ورود مواد جامد موجود در محلول اسمزی به فضاهای بین سلولی آلو باشد. این نتیجه با نتایج اورتونو و همکاران (2010) که به بررسی کاربرد پیش‌تیمار اولتراسوند بر روی انتقال جرم و ساختمان میکروسکوپی پوست پرتقال در طی فرایند خشک‌کردن پرداختند، مطابقت دارد. با توجه به جدول 3، در ارتباط با تأثیر آبیگری اسمزی بر دانسیته ظاهری مشاهده می‌شود که در شرایط ثابت زمان اولتراسوند و زمان فرایند اسمز، با افزایش غلظت محلول اسمزی از بریکس 50 به 70، میزان دانسیته ظاهری افزایش یافته است. علت این موضوع، افزایش فشار اسمزی و ورود ماده جامد محلول (ساکارز) بیش‌تر به فضای بین سلولی نمونه‌های آلو است که باعث اتصال (پیوستگی) ماده جامد محلول به یکدیگر و کاهش فضاهای خالی بین سلولی می‌شود. اما با این وجود، افزایش دانسیته ظاهری با افزایش بریکس محلول اسمزی بین تیمارهای مختلف از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. هم‌چنین، جدول 3 نشان می‌دهد که در نمونه‌های پیش‌تیمار شده با تلفیق اولتراسوند و آبیگری اسمزی، با ثابت در نظر گرفتن زمان اولتراسوند و غلظت محلول

جدول (4-الف) پارامترهای آماری مدل‌های 1، 2 و 3 بر اساس جدول 2 برای تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1

مدل									
3			2			1			تیمار
RMSE	SSE	R ²	RMSE	SSE	R ²	RMSE	SSE	R ²	
0/004	0/00006	0/9803	0/009	0/0002	0/9434	0/013	0/0005	0/8071	Control
0/006	0/0001	0/9531	0/011	0/0003	0/9254	0/011	0/0003	0/8818	U10-B50-T60
0/002	0/00002	0/9951	0/007	0/00009	0/9817	0/017	0/0009	0/8237	U10-B70-T60
0/008	0/00024	0/9855	0/005	0/00004	0/9974	0/028	0/0024	0/8539	U30-B50-T60
0/004	0/00006	0/9969	0/050	0/0051	0/7418	0/042	0/0054	0/7277	U30-B70-T60
0/006	0/0001	0/9827	0/005	0/00005	0/9936	0/018	0/0009	0/8721	U10-B50-T120
0/003	0/00003	0/9959	0/004	0/00004	0/9952	0/021	0/0013	0/8263	U10-B70-T120
0/012	0/00055	0/9721	0/008	0/0001	0/9940	0/033	0/0034	0/8268	U30-B50-T120
0/005	0/00009	0/9971	0/037	0/0028	0/9175	0/047	0/0067	0/7999	U30-B70-T120
0/008	0/00028	0/9565	0/011	0/0002	0/9610	0/016	0/0007	0/8850	U10-B50-T180
0/009	0/00033	0/9501	0/009	0/0002	0/9744	0/014	0/0006	0/9113	U10-B70-T180
0/004	0/00005	0/9982	0/041	0/0033	0/8856	0/049	0/0072	0/7466	U30-B50-T180
0/016	0/00104	0/9694	0/019	0/0007	0/9794	0/041	0/0052	0/8489	U30-B70-T180
0/005	0/00008	0/9917	0/006	0/00007	0/9934	0/023	0/0017	0/8363	U10-B50-T240
0/004	0/00008	0/9944	0/032	0/0021	0/8614	0/029	0/0025	0/8307	U10-B70-T240
0/008	0/00029	0/9863	0/003	0/00001	0/9993	0/049	0/0071	0/6687	U30-B50-T240
0/016	0/00105	0/9773	0/071	0/0099	0/7847	0/077	0/0176	0/6187	U30-B70-T240

جدول (4-ب) پارامترهای آماری مدل‌های 4، 5 و 6 بر اساس جدول 2 برای تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1

مدل									
6			5			4			تیمار
RMSE	SSE	R ²	RMSE	SSE	R ²	RMSE	SSE	R ²	
0/004	0/00004	0/9846	0/004	0/00006	0/9793	0/004	0/00004	0/9853	Control
0/005	0/00009	0/9693	0/006	0/00015	0/9515	0/006	0/00011	0/9650	U10-B50-T60
0/001	0/000003	0/9993	0/003	0/00003	0/9939	0/002	0/000009	0/9981	U10-B70-T60
0/001	0/000006	0/9996	0/008	0/00026	0/9841	0/002	0/00001	0/9991	U30-B50-T60
0/003	0/00004	0/9981	0/004	0/00005	0/9973	0/005	0/00007	0/9966	U30-B70-T60
0/0005	0/0000007	0/9999	0/006	0/00014	0/9813	0/001	0/000005	0/9994	U10-B50-T120
0/0006	0/000001	0/9998	0/003	0/00004	0/9950	0/003	0/00003	0/9953	U10-B70-T120
0/009	0/00024	0/9873	0/012	0/00057	0/9706	0/007	0/00013	0/9933	U30-B50-T120
0/002	0/00002	0/9994	0/005	0/00011	0/9966	0/007	0/00016	0/9951	U30-B70-T120
0/007	0/00016	0/9736	0/008	0/00028	0/9549	0/008	0/00020	0/9683	U10-B50-T180
0/005	0/00007	0/9897	0/009	0/00035	0/9461	0/005	0/00007	0/9890	U10-B70-T180
0/004	0/00005	0/9982	0/004	0/00005	0/9982	0/005	0/00006	0/9977	U30-B50-T180
0/013	0/00056	0/9835	0/016	0/00109	0/9681	0/015	0/00066	0/9807	U30-B70-T180
0/001	0/000004	0/9996	0/005	0/00009	0/9910	0/002	0/00001	0/9986	U10-B50-T240
0/0009	0/000002	0/9998	0/005	0/00009	0/9938	0/005	0/00007	0/9950	U10-B70-T240
0/005	0/00007	0/9964	0/008	0/00027	0/9875	0/009	0/00023	0/9892	U30-B50-T240
0/010	0/00035	0/9925	0/016	0/00104	0/9774	0/011	0/00036	0/9921	U30-B70-T240

جدول (5) مقادیر ضرایب a و b مدل پیشنهادی (مدل 6 جدول 2) حاصل از آنالیز رگرسیونی تیمارهای مختلف بر اساس جدول 1

تیمار	a	b	c
U10-B50-T60	0/2901	1/18	0/2875
U10-B70-T60	0/7215	1/241	0/6862
U30-B50-T60	0/4785	1/328	0/4912
U30-B70-T60	2/022	0/512	1/906
U10-B50-T120	0/3853	1/23	0/3934
U10-B70-T120	0/749	1/269	0/7202
U30-B50-T120	0/4958	1/35	0/5106
U30-B70-T120	1/006	1/505	1/001
U10-B50-T180	0/3013	1/221	0/3078
U10-B70-T180	0/155	1/244	0/169
U30-B50-T180	1/583	1/525	1/552
U30-B70-T180	0/469	1/443	0/4988
U10-B50-T240	0/5965	1/263	0/6004
U10-B70-T240	0/7063	1/325	0/7056
U30-B50-T240	4/395	1/774	4/067
U30-B70-T240	8/44	2/69	8/017

جدول (6) راهنمای استفاده از جداول و نمودارها

عنوان	علائم اختصاری
دانسیته ظاهری	ρ_b
دانسیته تولون	ρ_{t0}
ضرایب مدل‌ها	a, b, c
محتوای رطوبت (گرم آب بر گرم ماده خشک)	X
حجم نهایی	V
حجم اولیه	V_0
حجم در لحظه t	V_t
جرم تولون جابه‌جاشده	M
جرم پیکنومتر حاوی نمونه و تولون	m
جرم نمونه غذایی	m'
جرم پیکنومتر خالی	m''
ضریب تبیین	R^2
ریشه متوسط مربعات خطا	RMSE

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر به‌کارگیری هم‌زمان اولتراسوند و آبیگری اسمزی بر میزان دانسیته ظاهری آلو و مدل‌سازی آن در طی خشک‌کردن مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که پیش‌تیمارهای اولتراسوند و آبیگری اسمزی از لحاظ آماری تأثیر معنی‌داری بر دانسیته ظاهری دارند. افزایش زمان اولتراسوند از 10 تا 30 دقیقه به‌علت ایجاد کانال‌های میکروسکوپی و پراکنده‌کردن ترکیبات مومی سطح پوست آلو، سبب سهولت انتقال جرم مواد جامد (ساکارز) در طی آبیگری اسمزی و افزایش دانسیته ظاهری نسبت به تیمار شاهد گردید. هم‌چنین، آبیگری اسمزی نیز منجر به افزایش دانسیته ظاهری نسبت به تیمار شاهد شد. مدل‌سازی تغییرات دانسیته ظاهری تیمارها با مدل‌های مختلف نشان داد که مدل توسعه یافته پیشنهادی (مدل 6 جدول 2)، به‌عنوان بهترین مدل پیش‌بینی‌کننده دانسیته ظاهری آلو تحت شرایط مورد آزمایش، انطباق خوبی ($R^2=0/9924$) را با مقادیر آزمایشی دارد.

$$R^2=0/96 \quad (4)$$

$$b = -1.94 \times 10^{-12} \times (U \times B \times T)^2 - 1.44 \times 10^{12} \times U^2 + 1.24 \times 10^{11} \times B^2 + 2.68 \times 10^{-5} \times T^2 - 2.18 \times 10^{-6} \times (U \times B \times T) - 1.39 \times 10^{-3} \times (U \times B) + 1.66 \times 10^{-4} \times (U \times T) + 5.78 \times 10^{13} \times U - 1.49 \times 10^{13} \times B - 1.26 \times 10^{-2} \times T$$

$$R^2=0/88 \quad (5)$$

$$c = 2.65 \times 10^{-11} \times (U \times B \times T)^2 - 3.32 \times 10^{12} \times U^2 + 2.85 \times 10^{11} \times B^2 + 1.52 \times 10^{-4} \times T^2 - 2.62 \times 10^{-5} \times (U \times B \times T) - 2.98 \times 10^{-3} \times (U \times B) + 1.73 \times 10^{-3} \times (U \times T) + 1.33 \times 10^{14} \times U - 3.42 \times 10^{13} \times B - 5.61 \times 10^{-2} \times T$$

ضرایب a، b و c مربوط به مدل پیشنهادی برای سطوح مختلف زمان اولتراسوند، غلظت محلول اسمزی و زمان فرایند اسمز در جدول 5 آمده است. مزیت مدل‌سازی فوق این است که با استفاده از معادلات 3، 4 و 5، ضرایب a، b و c را می‌توان بر حسب سه متغیر مستقل (زمان اولتراسوند، غلظت محلول اسمزی و زمان فرایند اسمز) محاسبه کرد و با جایگذاری این ضرایب در مدل 6 جدول 2، می‌توان دانسیته ظاهری را بدون انجام آزمایش در سطوح مختلف زمان اولتراسوند، غلظت محلول اسمزی و زمان فرایند اسمز به‌دست آورد.

منابع

- [6] Seiedlou, S., Ghasemzadeh, H. R., Hamdami, N., Alati, F. T., Moghaddam, M. (2010). Convective drying of apple: mathematical modeling and determination of some quality parameters. *International Journal of Agriculture and Biology*, 12, 171-178.
- [7] Sacilik, K., Elicin, A. K., Unal, G. (2006). Drying kinetics of Uryani plum in a convective hot-air dryer. *Journal of Food Engineering*, 76, 362-368.
- [8] Qing-guo, H., Min, Z., Mujumdar, A. S., Wei-hua, D., Jin-cai, a. S. (2006). Effects of Different Drying Methods on the Quality Changes of Granular Edamame. *Drying Technology*, 24, 1025-1032.
- [9] Koc, B., Eren, I., Ertekin, F. K. (2008). Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering*, 85, 340-349.
- [10] Guine, R. D. P. F. (2006). Influence of drying method on density and porosity of pears. *Food and bioproducts processing*, 84, 179-185.
- [1] Nunes, C., Saraiva, J. A., Coimbra, M. A. (2008). Effect of candying on cell wall polysaccharides of plums (*Prunus domestica* L.) and influence of cell wall enzymes. *Food Chemistry*, 111, 538-548.
- [2] Doymaz, I. (2004). Effect of dipping treatment on air drying of plums. *Journal of Food Engineering*, 64, 465-470.
- [3] Ibitwar, B. B., Kaur, B., Arora, S., Pathare, P. B. (2008). Osmo-Convective Dehydration of Plum. *International Journal of Food Engineering*, 4(8).
- [4] Tarhan, S. (2007). Selection of chemical and thermal pretreatment combination for plum drying at low and moderate drying air temperatures. *Journal of Food Engineering*, 79, 255-260.
- [5] Jazini, M. H., Hatamipour, M. S. (2010). A new physical pretreatment of plum for drying. *Food and Bioproducts Processing*, 88, 133-137.

- [21] Fuente-Blanco, S. d. I., Sarabia, E. R.-F. d., Acosta-Aparicio, V. M., Blanco-Blanco, A., Gallego-Juarez, J. A. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, e523-e527.
- [22] Sun, W. D. (2005). Emerging technology for food processing. Chapter 13, 338-339.
- [23] Nowacka, M., Wiktor, A., Sledz, M., Jurek, N., Witrowa-Rajchert, D. (2012). Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *Journal of Food Engineering*, 113, 427-433.
- [24] Jambrak, A. R., Mason, T. J., Paniwnyk, L., Lelas, V. (2007). Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *Journal of Food Engineering*, 81, 88-97.
- [25] Monnerat, S. M., Pizzi, T. R. M., Mauro, M. A., Menegalli, F. C. (2010). Osmotic dehydration of apples in sugar/salt solutions: Concentration profiles and effective diffusion coefficients. *Journal of Food Engineering*, 100, 604-612.
- [26] Dehghannya, J., Emam-Djomeh, Z., Sotudeh-Gharebagh, R., Ngadi, M. (2006). Osmotic Dehydration of Apple Slices with Carboxy-Methyl Cellulose Coating. *Drying Technology*, 24, 45-50.
- [27] Fernandes, F. A. N., Linhares Jr., F. E., Rodrigues, S. (2008). Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15, 1049-1054.
- [28] Chua, K. J., Chou, S. K., Hawlader, M. N. S., Mujumdar, A. S., Ho, J. C. (2002). Modeling the moisture and temperature distribution within an agricultural product undergoing time-varying drying schemes. *Bio-systems Engineering*, 81, 99-111.
- [29] Ioannou, I., Guiga, W., Charbonnel, C., Ghoul M. (2011). Frozen mirabelle plum drying: Kinetics, modelling and impact on biochemical properties. *Food and Bioproducts Processing*, 89, 438-448.
- [11] Khalloufi, S., Almeida-Rivera, C., Bongers, P. (2010). A fundamental approach and its experimental validation to simulate density as a function of moisture content during drying processes. *Journal of Food Engineering*, 97, 177-187.
- [12] Mayor, L., Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a Review. *Journal of Food Engineering*, 61, 373-386.
- [13] Nam, J. H., Song, C. S. (2007). Numerical simulation of conjugate heat and mass transfer during multi-dimensional freeze drying of slab-shaped food products. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 4891-4900.
- [14] Curcio, S., Aversa, M., Calabro, V., Iorio, G. (2008). Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation. *Journal of Food Engineering*, 87, 541-553.
- [15] Fernandes, F. A. N., Rodrigues, S. (2007). Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*, 82, 261-267.
- [16] Ortuno, C., Pérez-Munuera, I., Puig, A., Riera, E. (2010). Influence of power ultrasound application on mass transport microstructure of orange peel during hot air drying. *Physics Procedia*, 3, 153-159.
- [17] Chemat, F., Zill-e-Huma, Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18, 813-835.
- [18] Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., Youssef, M. M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, 48, 410-427.
- [19] Soria, A. C., Villamiel, M. (2010). Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Food Science and Technology*, 21, 323-331.
- [20] Fernandes, F. A. N., Gallao, M. I., Rodrigues, S. (2008). Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT - Food Science and Technology*, 41, 604-610.

- [30] Menges, H. O., Ertekin, C. (2006). Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums. *Energy Conversion and Management*, 47, 2337-2348.
- [31] Yan, Z., Sousa-Gallagher, M. J., Oliveira, F. A. R. (2008). Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering*, 84, 430-440.
- [32] Steel, R. G. D., Torrie, J. H., Dickey, D. A. (1997). Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. New York: McGraw-Hill.
- [33] Talla, A., Puiggali, J.-R., Jomaa, W., Jannot, Y. (2004). Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. *Journal of Food Engineering*, 64, 103-109.